

Title	超電導マグネットの冷却
Author(s)	山本, 純也
Citation	大阪大学低温センターだより. 1983, 43, p. 13-16
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/7326
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

超電導マグネットの冷却

低温センター 山本純也 (吹田 4106)

1. はじめに

超電導マグネットの最近の進歩は著しく、安定で高い磁場の発生装置として大学内でも広く利用されるようになってきている。自動車や電子機器と同じく今では国産品が輸入品を信頼性で上まわっているが、高性能(例えば高均一度)という点ではまだ外国品が優位にたっており、正に日本産業の図の通りである。

さてこのような超電導マグネットに使用する線材の開発も積極的に行なわれているが、実用材料としてはNbTi(臨界温度9.6 K)とNb₃Sn(同17 K)に限定されている。したがってこれらの線材で作られた超電導マグネットを種々のじょう乱(結果的に線材中の局部的温度上昇を引き起す)があっても安定に使用できるためには、液体ヘリウム温度に冷却することが最も基本的な条件である。すなわち超電導マグネット技術には必然的に液体ヘリウム温度への冷却技術が含まれる。筆者は低温センター吹田分室に隣接する工学部超電導工学実験センターにおける低温工学研究を担当している一人として冷却試験設備の設計、パルスマグネットの運転に関与したのでその経験をもとに以下の原稿を書いた。

2. 冷却モード

図1にヘリウムの相図を示す。一般の超電導マグネットは1気圧下の沸点にある液体ヘリウム(図の飽和蒸気圧曲線上の●)で冷却される。このときすべての発熱は液体ヘリウムの潜熱で吸収され、このため一部の液体ヘリウムは蒸発する。超流動ヘリウムはその高い熱伝導率から応用が期待されているが、飽和蒸気圧より1気圧(△)における状態の方が熱伝導率が高いため最近急激に研究が行われている。

超電導マグネットも大型化して来ると液槽に液体ヘリウムを入れる方式では超電導破壊時の安全性や予冷の困難さから限界に来る。そこでコイル導体に冷却チャンネルをはじめから持つ強制冷却型のコイルが大勢をしめよう。このときの冷媒として飽和蒸気圧ヘリウム(図の●)や超臨界ヘリウム(図の□)が考えられる。我々は冷却チャンネル内で相変化の起らない超臨界ヘリウムを有望と考え研究に着手している。

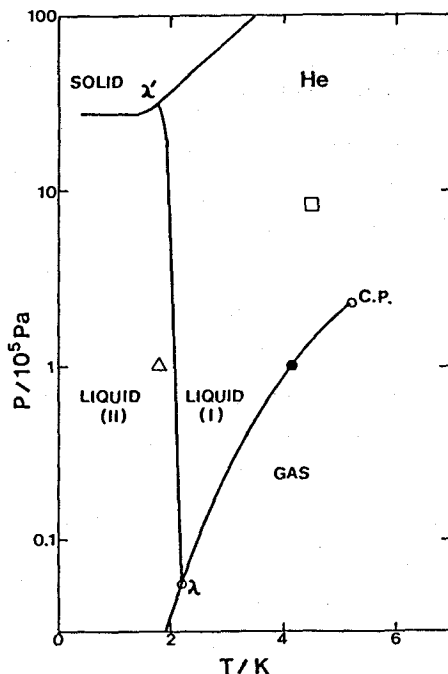


図1 ヘリウムによる冷却モード

- は飽和蒸気圧曲線上の液体ヘリウム
- は現在研究中の強制冷却用超臨界ヘリウム、
- △は加圧超流動ヘリウムを示す。

3. 冷却試験設備

超電導工学実験センターでは各種の装置の冷却試験を行うために図2に示す冷却試験設備を設置した。この装置の中心となるヘリウム冷凍機は低温センターに昭和43年度に設置されたものを借り受け冷凍機に改造したものである。20Kで90W、または液体ヘリウムを8 l/h 製造（図の超臨界ヘリウム発生装置の熱交換器と液槽を使用したとき）する能力を持つので、我々の計画している基礎研究を行うことは可能である。従来阪大では液体ヘリウム・窒素等の液体寒剤しか使用できなかったのに対し、任意の温度のヘリウムガスを利用できるようになったので研究の幅は広げることができるようになった。

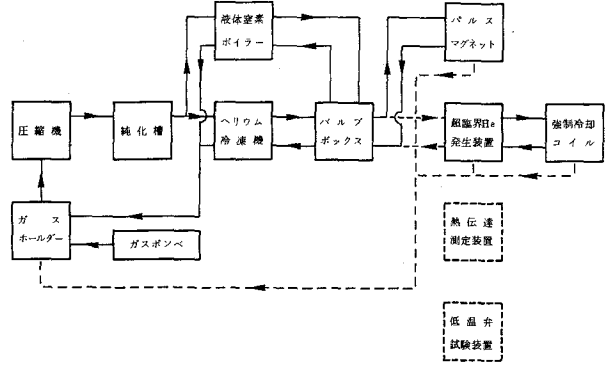


図2 超電導工学実験センターの冷却試験設備フロー図

4. 超電導パルスマグネット

図3は超電導工学実験センターに設置されているパルスマグネットである。このマグネットとクライオスタットの主要な諸元を表1にのせている。冷却方式としてはいわゆる浸漬冷却型で、図1の●であらわされる液体ヘリウムを使用する。このマグネットは既に励磁速度5 T/sを達成し、超電導マグネットの制御の研究に使用されているが、冷却という立場からここに至るまでに次のような多くの問題を解決してきた。

- a. 常温から液体ヘリウム注入までの予冷
- b. 液体ヘリウムの注入
- c. 常時の侵入熱量（時にパワーリードの取扱い）
- d. パルス運転時の熱負荷

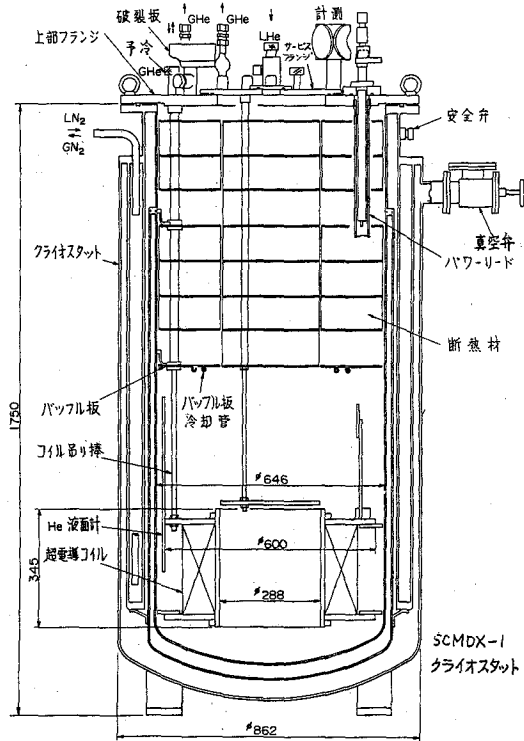


図3 超電導パルスマグネットの外形図

表1 超電導パルスマグネットの諸元

コイル中心磁場	5 T
最大動作電流	1976 A
コイル巻線内径	310 mm
" 外径	494 mm
" 高さ	256 mm
コイル外寸法内径	288 mm
" 外径	600 mm
" 高さ	345 mm
巻線	ダブルパンケーキ 14 層
コイルインダクタンス	0.264 H
貯蔵エネルギー	515 kJ
クライオスタット外径	862 mm
" 高さ	1750 mm
ヘリウム容器内径	646 mm
" 高さ	1600 mm
電流導入端子 (2本) AMI 製	3000 A

e. クウエンチ対策

前述の冷却試験設備はこのマグネットの予冷に威力を発揮した。常温から100 K程度まではヘリウムガスを液体窒素ボイラーで約80 Kに冷却し、これをコイルの底から吹き出すと、このガスはコイルの巻線の隙間を通してコイルを冷却する。すなわちヘリウムガスの顕熱(エンタルピー差)を利用している。図4は14層のダブルパンケーキコイルの予冷時のコイル温度分布を測定したものでコイルの上下で予冷がすすみ中央ほど冷えにくいことがよく示されている。

コイル温度100 K以下ではヘリウム冷凍機からの低温ヘリウムガス(約20 K)を使用してコイルを予冷する。設計目標温度は20 Kであるがこのシステムで容易に目標を達成することができた。予冷に使われたガスを冷凍機に戻すとコイル温度は11 Kにまで冷やすことができる。この予冷方式は液体窒素をマグネット用デュワーに直接注入する方式に較べて多量の液体窒素とヘリウムガス循環系を必要とするが、デュワー内を汚染していないことと、到達予冷温度が低いことで液体ヘリウムの注入が極めて容易になる。

このパルスマグネットの運転には約200 lの液体ヘリウムを用意する。予冷温度が低いため液体が溜りはじめるまでに消費する液体ヘリウムは10 l以下で一度に使用する量の多い割には液の移送は容易である。定常時の液体ヘリウム蒸発量を決めているのは2本のパワーリード(3000 A用を使用)であるから各リードを通して40 Nl/min程度の蒸発ガスを抜きヘリウムの顕熱を利用して冷却する。

余談になるがガス冷却型パワーリードは不安定性を起しやすい典型的なものである。通電中何らかの原因で流量が減ると、温度が上りガスの密度が小さくなる。冷却効果が悪くなると銅導体の比抵抗が上りジュール発熱が増し、その部分の温度が更に上る。パワーリードが1本しかなければ自己回復の可能性もあるが、2本あるためガスは良く冷えている方は

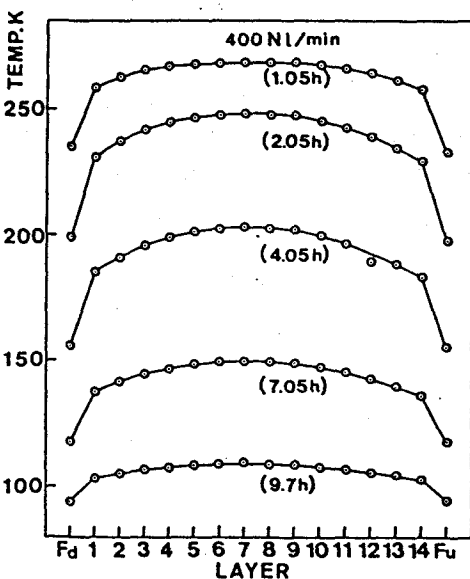


図4 予冷時のコイル内温度分布

()内は予冷開始からの時間。14層のダブルパンケーキの下端から番号をつけている。Fd, Fuは下端、上端のフランジを表わす。

かり流れようとするので不安定を助長している。筆者の予感では大型マグネットの最大の弱点がこのパワーリードであると思われる。ちなみに今流行の超電導NMR装置では永久電流モードで運転し、パワーリードは励磁後取り去っている。

交流的な励磁を行うと導体のヒステリシス損失やカップリング損失がかなりの発熱となる。例えば5 T/sで励磁すると1 kW程度がこのマグネットで発熱する。また金属ヘリウムデュワーを使っていると渦電流が流れこれからも液体ヘリウムが蒸発する。このためプラスチック（ガラスFRPが普通使われる）デュワーの開発が進んでいる。冷却の立場からパルス励磁時の液体ヘリウム蒸発をどう処理するか非常に悩んだが、結果的には高速パルスはそれほど長く続かず、各構成要素の熱容量が大きいこともあって通常の回収装置で蒸発ガスの処理が可能であった。

クウエンチ時のヘリウムガスの処理について伝統的な考え方は全量を回収できるガスバックをマグネットのすぐ近くに置くことである。我々は実験室のスペースと経済性・安全性を考慮した結果、クウエンチ時はガスを大気に開放する方法をとった。その理由は最初に書いたように今作られているマグネットの信頼性は非常に高く、通常の運転ではクウエンチはしないことである。クウエンチは異常操作、例えば電流最大値設定の誤り（我々の経験した2回のクウエンチはいずれもこの種に属する）やヘリウム液面の異常低下に気付いていない等が原因であると断定することにした。このためクライオスタットからは1) 通常のパワーリードを経由する回収、2) 蒸発量の多いとき（初期充填時または交流励磁時）のための回収口、3) 内圧0.1 kg/cm²で働く保圧弁付回収口の他に、4) 内圧0.3 kg/cm²で働く大気開放用電磁弁、5) 内圧0.5 kg/cm²で働く大気開放保圧弁、6) 内圧1 kg/cm²で働く破壊板の合計6系統を設けた。回収系統には配管抵抗があるためクウエンチ時には4)の電磁弁による大気開放が最も効果的に働いている。

5. これからの課題

パルスマグネットの冷却面からの研究課題としては交流損失の理論的予測と実験的にこれを低減することが残っているが今年度中に一応の結論を出せるものと思っている。我々は現在強制冷却型超電導マグネットのための基礎研究に取り組んでいるが、永年の経験の蓄積のある浸漬冷却に比してまだまだ幼稚な段階である。